

# Fuzzy DP를 이용한 유역의 저수지 시스템 최적운영 기법의 개발

## Development of Optimal Basin-wide Multi-reservoir System Operation Method using Fuzzy DP

이재응\*, 최성규\*\*  
Jaeung Yi, Sung-Gyu Choi

### 요 지

국내에서도 최근 이상기후 현상이 빈번하게 발생하고 있고, 이로 인해 매년 봄가뭄과 여름홍수가 반복적으로 발생하여 효율적 수자원 관리의 중요성이 더욱 강조되고 있다. 최적 저수지 운영을 통한 효율적인 수자원 이용으로 과다한 무효 방류와 같이 낭비되는 수자원을 절감시켜 신규 수자원 개발과 유사한 효과를 획득하고, 기존 시설에 의한 지역 용수의 안정적인 공급으로 신규 수자원 개발 억제에 의한 비용 절감의 필요성과 유역의 수자원 변화를 평가하기 위한 모형의 개발이 필요하다. 본 연구에서는 저수량 확보, 생활·농업·공업·하천유지용수 공급, 홍수조절, 수력발전 등의 다양한 목적들을 적절히 고려하고, 사용자의 요구에 따라 목적별 우선권을 변경할 수 있도록 적절한 membership 함수를 구축하여 fuzzy DP 모형을 개발하였다. 또한, 개발된 fuzzy DP 모형에 소양강 다목적댐의 기왕의 수문자료를 도입한 모형의 최적화 운영결과와 기왕의 실적자료를 비교 검토하여 최적화 운영의 우수성을 확인하였다. 본 연구의 결과는 향후 저수지의 효율적인 운영을 위한 지침으로 사용될 수 있을 것이며, 유역의 수자원 영향 평가에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : fuzzy 집합이론, fuzzy 동적 프로그래밍, membership 함수, 저수지 최적운영

### 1. 서 론

Zadeh(1965)는 membership 함수와 membership 함수에 적용할 연산자라는 fuzzy 집합 이론의 두 가지 중요한 특성을 제안하였다. membership 함수는 fuzzy 사상의 불확실성 정도를 수학적 형태로 나타내는 도구로, 확률이론에서 확률함수와 유사한 역할을 한다. membership 함수의 정의에 따라 어느 집합에 속하는지 속하지 않는지를 점진적인 변화로 나타낼 수 있다. 즉,  $\mu(x) = 1$ 이면 완전한 membership이고,  $0 < \mu_A(x) < 1$ 이면 중간 membership,  $\mu(x) = 0$ 이면 완전한 nonmembership을 나타낸다. 즉,  $\mu(x) = 1$ 과  $\mu(x) = 0$ 인 경우는 fuzzy 집합이 아니라 명확한 집합이고, fuzziness 특성은  $0 < \mu_A(x) < 1$ 인 경우에만 발생한다.

Dombi(1990)는 membership 함수의 일반적인 특성을 다음과 같이 기술하였다. 첫째, 모든 membership 함수는 연속이다. 둘째, membership 함수는 구간  $[a,b]$ 를  $[0,1]$ 로 또는  $\mu(a,b)$ 를  $[0,1]$ 로 mapping한다. 셋째, membership 함수는 (i) 단조증가하거나 (ii) 단조감소하거나 (iii) 단조증가부와 단조감소부로 구분할 수 있다. 넷째, 전체 구간에서 단조 membership 함수는 (i) 볼록함수이거나 (ii) 오목함수이거나 (iii) 구간  $[a,b]$ 에서,  $[a,c]$ 는 볼록함수이고  $[c,b]$ 는 오목함수인 점  $c$ 가 존재한다(S 형태의 함수). 다섯째, 단조증가 함수는  $\mu(a) = 0$ 이고  $\mu(b) = 1$ 인 특성을 가지고, 단조감소 함수는  $\mu(a) = 1$ 이고  $\mu(b) = 0$ 인 특성을 가진

\* 정회원·아주대학교 환경건설교통시스템공학부 교수E-mail : [jevi@ajou.ac.kr](mailto:jevi@ajou.ac.kr)

\*\* 정회원·아주대학교 환경건설교통시스템공학부 석사과정E-mail : [oxy798@ajou.ac.kr](mailto:oxy798@ajou.ac.kr)

다. Zimmermann(1987)은 경험적으로 membership 함수를 결정할 수 있는 두 가지 모형을 제안하였다. 각각 A, B인데, 이들은 mapping 특성이 상이하다. membership 함수의 모형 A에서  $\mu$ 는 경험적 관계구조, n 개의 요소를 가진 집합 X, “X, S1, ... , Sn”을 수치적 관계구조 “[0,1], U1, ... , Un”으로 mapping한다. membership 함수의 모형 B에는 두 개의 수치적 관계 구조가 주어진다. 즉, 모형 B는 하나의 수치적 구조를 동일한 형태 관계의 다른 수치적 구조로 mapping한다. 이것은 기본적으로 변환과 동일하다.

일반적으로 다목적 저수지는 생활·공업·농업용수 공급, 발전, 홍수조절, 수질조절, 어류 확보, 여가활동 등 여러 가지 목적을 위해 운영된다. 이러한 시스템의 월간 최적 운영은 대개 초기 저류량과 월간 유입량이 주어질 때, 제약조건 내에서 주어진 수요들을 만족시키면서 목적함수를 최적화하는 최적 방류량을 발견하는 것이다. 물론 서로 다른 수요들은 때때로 경합하거나 보완적이고, 절충해야 하는 문제가 발생하기도 한다.

fuzzy 환경에서 다목적 저수지의 운영을 고려하는 경우, 목적함수와(또는) 제약조건이 정확하게 정의되지 않고 모호할 때, fuzziness는 목적함수와(또는) 제약조건에 적용될 수 있다. 이러한 모호함은 문제구성에 포함된 주관적 속성 때문일 수 있다. 예를 들어 용수공급, 수력발전, 홍수조절과 같은 전통적인 물이용은 모호하게 구성될 수 있다. 반면에 정량적으로 나타내기 힘든 목적들은 fuzziness에 의해 취급될 수 있다. 따라서 환경과 여가목적과 같이 정량적으로 나타내기 어려운 목적들을 다목적 문제에 포함시키기 위해서 굳이 금전적인 형태로 나타낼 필요가 없다.

## 2. 모형구축

### 2.1 저수지 시스템

다목적댐인 소양강댐은 용수공급, 홍수조절, 수력발전 등의 목적으로 운영된다. 이외에도 하천 내 중요 지점에서 생태계 보존을 위한 목적으로 적정 하천유지유량을 만족시켜야 한다. 홍수조절, 용수공급, 수력발전과 같은 목적들은 상충되는 경우가 종종 발생하기 때문에 이러한 목적들을 완전히 만족시킨다는 것은 매우 어렵다. 따라서 각 기간에 어떤 목적은 일부 희생을 감수하더라도 다른 목적을 최대한 달성하기 위해 저수지 시스템을 운영하도록 해야 하지만, 이러한 목적들 간의 절충은 목적함수가 3개 이상이면 절충 분석(tradeoff analysis)이 어렵다. 이와 같이 정확히 평가하기 어렵고, 때때로 상호 상충되는 목적과 제약조건들이 존재하기 때문에 fuzzy 최적화 기법을 사용하여 분석하기에 적절한 형태의 최적화 문제이다.

### 2.2 최적화 문제의 구성

fuzzy 최적 의사결정 문제의 fuzzy 목표는 ‘소양강댐에서 분석기간 말인 9월말 저류량이 상시만수위에 가능한 근접하도록 확보’하는 것이다. fuzzy 제약조건은 다음과 같은 사항들을 고려하였다.

첫째, ‘안정적인 생·공·농업용수, 하천유지용수 공급’

둘째, ‘월 별로 충분한 수자원 확보’

셋째, ‘신뢰할만한 홍수조절 공간 확보’

넷째, ‘효율적인 수력발전’

### 2.3 Membership 함수의 구성

#### 2.3.1 9월말 저류량

Fuzzy 목적인 소양강댐의 9월말 목표저류량은 상시만수위 EL.193.5m에 해당하는 저류량이다. 9월말 목표 수위의 membership 함수는 상시만수위 EL.193.5m에 해당하는 저류량 2,543.8MCM에서 full achievement 1 값을 가지고, EL.194.0m에 해당하는 저류량 2,575.7MCM에서 null achievement 0 값을 가지며, 이 사이에서는 선형으로 변한다고 가정하였다. 또한, 소양강댐 9월말 저수위 실적의 50% quantile에 해당하는 저류량 1,977.5MCM에서 null achievement 0를 가지며, EL.193.5m에 해당하는 저류량 2,543.8MCM 사이에서 선형으로 변한다고 가정하였다. 따라서 fuzzy 목적에 대한 membership 함수의 형태는 Fig. 1 과 같다.

### 2.3.2 안정적인 용수공급

첫째, 일반적으로 월마다 생·공용수 수요가 변화하기 때문에 membership 함수를 매 월에 대해 구성해야 하지만, 소양강댐에서는 생·공용수에 대한 하류의 용수공급 계획은 연중 일정하다. 생·공용수를 위한 membership 함수는 월 용수공급 목표인 102MCM/월(38.1m<sup>3</sup>/s)에서 full achievement 1 값을 가지고, 목표의 90%에 해당하는 91.8MCM/월 에서 null achievement 0 값을 가지며, 이 사이에서는 선형으로 변한다고 가정하였다. 댐에서 최대한 저류량을 확보하기 위해서 용수공급 목표를 초과하는 방류량을 가능한 한 억제해야 하므로 목표의 200%에 해당하는 204MCM/월 에서 null achievement 0 값을 가지며, 이 사이에서는 선형으로 변한다고 가정하였다.

둘째, 소양강댐에서 공급해야 하는 농업용수는 3월, 10월에 0.6m<sup>3</sup>/s, 4월부터 9월까지 1.0m<sup>3</sup>/s로 이를 membership 함수에서 고려하였다.

셋째, 소양강댐에서 하천유지용수 공급을 위해 8.1m<sup>3</sup>/s의 유량을 공급할 것을 목표로 하였다. membership 함수 구성을 위해 목표유량 8.1m<sup>3</sup>/s를 월유량으로 환산한 21.0MCM 이상에서 full membership을 가지고, 목표유량의 50%에 해당하는 유량 10.5MCM에서 null membership을 가진다고 가정하였다.

이와 같이 생·공용수, 농업용수, 하천유지용수를 위한 membership 함수를 각각 작성한 후 이를 조합하여 소양강댐으로부터 공급해야 하는 용수공급에 대한 membership 함수를 Fig. 2와 같이 작성하였다.

### 2.3.3 충분한 수자원 확보

비홍수기인 10월부터 6월까지의 각 월의 0.9(90%) quantile에 해당하는 저류량에서 full achievement 1의 값을 가지고, 각 월의 0.5(50%) quantile에 해당하는 저류량에서 null achievement 0 값을 가지며, 이 사이에서는 선형으로 변한다. 각 월의 0.9 quantile에 해당하는 저류량에서 상시만수위까지는 full achievement 값을 유지하며, 상시만수위를 초과하는 저류량은 곧 null achievement 로 떨어진다.

### 2.3.4 신뢰할만한 홍수조절 공간 확보

6월말부터 9월말의 호우기에 요구되는 저수지 운영은 홍수조절공간을 가능한 한 비워놓는 것이다. membership 함수는 제한수위 EL.190.3m에 해당되는 저류량 2,345.5MCM에서 full membership을 가지고, 홍수조절용량 500MCM의 30%가 찬 2,495.5MCM에서 full nonmembership을 갖는다. 6월부터 9월을 제외한 나머지 기간 동안에 membership 함수는 제한수위 EL.190.3m에 해당되는 저류량 2,345.5MCM에서 full membership을 가지고, 홍수조절용량 500MCM의 50%가 찬 2,595.5MCM에서 full nonmembership을 가진다.

### 2.3.5 효율적인 수력발전

본 연구에서는 월간 효율적인 수력발전을 고려하였다. 여기서 “효율적인”이라는 주관적 속성은 저수지에서 공급되는 에너지가 월 에너지 수요를 얼마나 만족시킬 수 있는가를 반영하기 위해 사용된다. 또한, 경제적 효율성, 에너지 가격, 에너지 시장도 membership 함수를 유도하는데 포함되어야 하지만, 본 연구에서는 간단하게 다음과 같은 조건으로 수력발전의 membership 함수를 고려하였다. 기왕의 월 발전량 실적을 조사하여 각 월의 평균값을 full achievement로 월 평균값의 50%에 해당하는 값을 null achievement로 고려하였다.

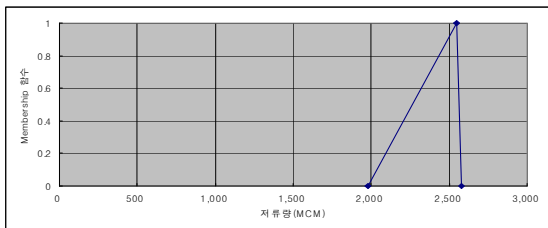


Fig. 1. Membership Function for Reservoir Storage at the End of September

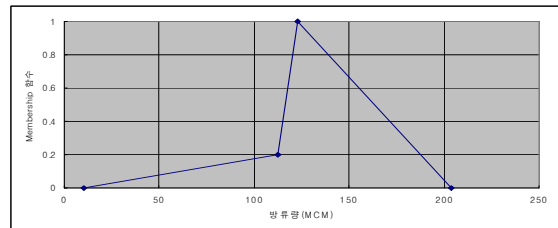


Fig. 2. Membership Function for Adequate Water Supply

### 3. 적용결과

#### 3.1 저류량

소양강 저수지에서 27년 동안의 실적 저류량과 최적 저류량을 Table 1 에 제시하였다. 8월말까지는 제한 수위에 해당하는 저류량을 초과하지 않고 홍수조절 공간을 확보하지만 9월말에는 제한수위 이상에 해당하는 저류량을 확보하여 이후의 용수공급에 대비하는 것을 알 수 있다. 즉, 일반적인 저수지 운영규칙을 잘 따르고 있는 것을 확인할 수 있다. 모든 월에서 최적 저류량이 실적 저류량보다 큰 값을 유지하고 있다. 이로부터 fuzzy 동적계획법에 의한 최적 결과가 수자원 확보에 유리하다는 것을 판단할 수 있다.

#### 3.2 9월말 저류량(목적함수)

Table 2 에서 fuzzy 최적화 기법에 의한 결과를 기왕의 실적과 비교하였다. 소양강의 최적운영 결과로 얻은 9월말 저류량의 27년 평균은 2,432.5MCM으로서, 기왕의 9월말 저류량의 27년 평균 1,950.5MCM에 비하여 24.7% 증가하였다. 또한 9월말 상시만수위에 가까운 저류량 2,500MCM이상인 경우는 최적운영의 경우 10개년 발생하였지만, 기왕의 운영의 경우 1개년도 발생하지 않았다. 이는 실제 운영의 경우 미래에 발생할 저수지 유입량에 대한 정보가 부족하기 때문에 운영자의 입장에서는 보수적으로 운영할 수밖에 없기 때문인 것으로 판단된다.

#### 3.3 방류량

소양강 저수지에서 27년 동안의 실적 방류량과 최적 방류량을 Table 3 에 제시하였다. 표로부터 6, 7, 8월을 제외하면 최적방류량이 실적방류량에 비해 작음을 알 수 있다. 소양강 저수지로부터 공급해야 하는 생·공용수 목표는 102MCM/월(38.1m<sup>3</sup>/s)이고, 농업용수 목표는 3월, 10월에 1.6MCM/월(0.6m<sup>3</sup>/s), 4월부터 9월까지 2.6MCM/월(1.0m<sup>3</sup>/s)로 이는 연중 100% 만족되고 있다. 단, 소양강 저수지에서 하천유지용수 공급목표인 21.0MCM/월(8.1m<sup>3</sup>/s)의 유량까지 모두 만족시키는 것은 갈수기인 11월부터 4월까지의 쉬운 일이 아니다. 그러나 이 기간 동안에도 의사결정자가 membership 함수를 조정하든지, 용수공급에 상대적으로 더 큰 가중치를 부여하면 방류량을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다. 풍수기를 비교하면 7, 8월에는 최적운영에서 방류를 더 많이 하였지만, 이는 6월까지 최적운영에서 저수량을 더 많이 확보했기 때문에 홍수기 홍수조절공간 확보를 위해 방류량을 증대시킨 것이다. 9월의 방류량을 보면, 최적운영에서 기왕의 운영보다 방류를 작게 하여 9월말 저류량을 충분히 확보하려는 것을 알 수 있다.

#### 3.4 수력발전

Table 4 에서 소양강댐에서 1975년부터 1994년까지 19년 동안의 기왕의 월별 실적 발전량과 fuzzy 최적화모형을 통해 얻은 월별 발전량을 비교하였다. 전반적으로 실적 발전량 값이 기왕의 발전량 값보다 크다는 것을 확인할 수 있다. 이는 최적운영은 수자원 확보가 주목적이므로 가능한 한 발전에 이용될 수 있는 방류량을 억제하고 저류량을 확보하는 방향으로 최적화가 이루어졌기 때문이다.

Table 1. Average Storage

※ 월초기준 (단위: MCM)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
실적 저류량	1495.7	1361.1	1293.3	1320.9	1305.1	1262.2	1544.1	1868.5	1925.0	1858.3	1773.6	1644.3
최적 저류량	2242.9	2148.8	2064.4	2022.9	2072.5	2090.3	2042.1	2071.8	2308.1	2432.5	2387.3	2330.3

Table 2. Optimal Reservoir Storage and Historical Storage at the End of September (단위:MCM)

년 도	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984
9월말 실적 저류량	2049.5	1860.4	1178.2	2143.8	2181.3	2312.0	2451.9	1935.4	1881.2	2466.9
9월말 최적 저류량	2354.0	2454.0	2254.0	2414.0	2354.0	2294.0	2534.0	2394.0	2534.0	2534.0

년 도	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994
9월말 실적 저류량	1802.4	2072.5	2223.9	1498.8	1940.1	2274.7	2023.0	2036.5	1977.5	1263.0
9월말 최적 저류량	2274.0	2434.0	2534.0	2314.0	2474.0	2534.0	2514.0	2494.0	2494.0	2214.0

년 도	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	평균
9월말 실적 저류량	2047.4	1425.2	1655.5	1956.9	2403.2	2082.5	1518.9	1950.5
9월말 최적 저류량	2454.0	2414.0	2534.0	2414.0	2534.0	2534.0	2394.0	2432.5

Table 3. Average Release (단위: MCM)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
실적 방류량	159.4	170.3	149.6	135.3	165.1	187.7	187.4	255.1	275.5	146.4	143.9	160.4
최적 방류량	111.9	109.3	119.1	112.8	127.0	197.7	435.6	324.1	198.6	123.9	114.8	118.4

Table 4. Average Hydropower (단위: MWhr)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	합계
실적 발전량	39.3	37.1	34.4	29.8	37.8	40.8	42.9	45.2	41.7	36.3	35.5	41.8	462.6
최적 발전량	23.7	23.3	23.8	22.8	27.3	27.1	48.2	36.5	36.2	24.0	23.7	23.7	340.3

주. 1975. 10 ~ 1994. 9 자료 사용

#### 4. 결론

이상의 연구결과에서 전반적으로 충분한 수자원 확보에 대한 달성도가 가장 높고, 신뢰할만한 홍수조절 공간 확보, 안정적인 용수공급, 효율적인 수력발전 순으로 membership 달성도가 높았다. 또 모든 경우에 최소한 한 달은 full membership과 full nonmembership을 가지고 있다. 결론적으로 fuzzy 동적계획법은 다목적 저수지의 최적 운영을 위해 적절히 사용될 수 있다. 또한 fuzzy 최적화기법이 일반적인 최적화기법에 비해 유리한 점은 membership 함수를 통해 fuzzy 목적과 fuzzy 제약조건의 만족도를 평가할 수 있고, fuzzy 개념을 통해 목적함수와 제약조건들을 만족시킬 수 있는 해를 찾을 수 있다는 점이다.

#### 감 사 의 글

본 연구결과는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-9-2)에 의해 수행되었습니다. 감사의 뜻을 표합니다.

#### 참 고 문 헌

1. Dombi, J. (1990) "Membership Function as an Evaluation." *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 35, pp. 1-21.
2. Zadeh, L. (1965) "Fuzzy Sets." *Information Control*, Vol. 8, pp. 338-353.
3. Zimmermann, H.J. (1987) *Fuzzy Sets, Decision Making and Expert Systems*. Kluwer Academic Publishers.